

循環型社会形成推進科学研究費補助金 総合研究報告書概要版

- ・研究科題名＝他産業も含めたマテリアルフローを考慮した建設系廃棄物の再資源化評価システムの構築に関する研究
- ・研究番号＝K1902, K2043, K2186
- ・国庫補助金精算所要額(円)＝10,688,000円
- ・研究機関＝2007-2009
- ・研究代表者名
清家剛(東京大学)
- ・共同研究者名
秋田典子(当時 東京大学)平成19年度
角陸順香(当時 東京大学)平成20年度

研究目的

建設産業は、現在も大量の廃棄物を排出しており、建設分野の一層のリサイクル推進は社会的に強く求められている。そんな中、建材の中には他産業の製品製造過程で生成される副産物を原料として利用しているものや、副産物が他産業での製品原料となっているものなどがある。このように他産業とのかかわりの中で資源循環が成立している材料に関しては、本質的な資源利用を捉える際、材料のライフサイクルを通したマテリアルフローを捉える必要であると考えられる。

そこで本研究では、他産業を含めたマテリアルフロー全体を評価するシステムを構築し、製品製造から廃棄にいたるまでのマテリアルフローにおける各プロセスのエネルギー消費量や廃棄物量等も含めて資源利用の在り方を評価する。

その上で環境負荷を総合的に低減するための資源利用の仕組みや、その実現に必要な施策を提案することを目的としている。

研究方法

本研究では、他産業も含めて本研究で対象とする各建材の主原料のマテリアルフローに関わる企業、業界団体等に対するヒアリング、製品製造工場及びリサイクル工場の現地調査を実施する。本研究の調査のフレームワークを表.1に示す。

表.1 本研究のフレームワーク

研究の内容 \ 対象建材	木質系建材	ガラス系建材	石膏ボード	塩ビサッシ
①マテリアルフローの実態の調査	H19	H19, H20	H19, H20	—
②再資源化の実態の調査	H19	H19, H20	H20	H20, H21
③他産業との関連の調査	H19, H20	H19, H20	H19, H20	-
④評価システムの検討	H19, H20, H21	H20, H21	H20, H21	H21

以上のフレームワークに基づき、各建材のマテリアルフローの実態、再資源化の実態を調査し

た。加えて、副産物発生時や、利用時に想定される他産業との関連の調査も並行しておこなった。

これら実態を把握した上で、統計資料などを用いてマテリアルフローの構築を行い評価システムの検討を行った。評価システムに関しては、各建材に対して詳細な実態に即した評価、日本国内のマクロ的な評価を行い建材の再資源化についての評価を行った。

結果と考察

1. 再資源化方法の実態

本研究では、木材、ガラス、石膏ボード、PVC（塩化ビニル）製品の関連事業者に対してヒアリング調査および施設見学などを行い再資源化の実態把握を行った。それらのヒアリング調査および、施設見学などより国内における木材、板ガラス、石膏ボードの副産物の性状および再資源化の実態を把握することができた。加えて文献調査および統計資料などを用いて、副産物の発生量などの調査も行った。以上の調査結果概要を表2にまとめる。

表.2 各材料のプロセスにおける副産物の発生量と再資源化方法

	プロセス	発生量	副産物の性状	再資源化方法	他産業
木質系建材	伐採	3400kton	間伐材・林地残材・未利用材	パルプ用チップ・集成材・木質ボード・燃料など	製紙・エネルギー利用
	製材製造	11894km ³	端材・樹皮・おが粉等	パルプ用チップ・燃料・木質ボード・堆肥・敷料など	製紙・エネルギー利用・農業
	廃棄	8074km ³	柱・板材等	パルプ用チップ・木質ボード・燃料など	製紙・エネルギー利用
石膏ボード	原料調達	276kton	副産石膏	石膏ボード原料	電力会社・化学会社
	ボード製造	276kton	加工端材	石膏ボード原料	-
	施工	400kton	施工端材	石膏ボード原料・地盤改良材・肥料等	土木・農業
	廃棄	1360kton	解体材	地盤改良材・肥料等	土木・農業
板ガラス	板ガラス製造	554kton	工場内端材(工場内カレット)	板ガラス原料	-
	窓加工	176kton	端材(市中カレット)	板ガラス原料・ガラス繊維・路盤材	ガラス繊維・路盤材
	廃棄	1068kton	解体材	-	-

2. 詳細なマテリアルフロー把握に基づく LCA 評価手法による環境影響評価

本研究では、LCA 評価手法を用いて、木質建材が製造され施工されるまでを対象に積み上げ法によってCO₂排出量を計算した。分析の対象としたのは、秋田県産材を用いた地産地消型の住宅（地産地消型事例A）および秋田県産材を用いた首都圏の住宅（一般流通型事例J）、北欧産材を用いる国内プレハブ住宅メーカー2社の住宅（輸入型事例M、S）である。以下に、CO₂排出量の計算方法及び結果を示す。

表 3. 調査事例の概要

事例 A	地産地消型	軸組構法	秋田県内に建つ秋田県産材を積極的に使用した住宅。伝統軸組構法を用いており、構造部材が太いのが特徴で、一般的な軸組構法より多くの木材を使用している。
事例 J	一般流通	軸組構法	首都圏で施工した軸組構法の住宅に秋田県産材を用いた場合の例である。秋田県内で製材乾燥をし、首都圏でプレカット加工を行っていると想定している。
事例 M	北欧輸入型	パネル構法	日本国内に年 1 万棟以上の工業化住宅を生産している大手工業化住宅メーカーの住宅。木質パネルで構面を構成する木質パネル構法を採用している。北欧産材は木質パネルの枠を作る芯材に用いられている。
事例 S	北欧輸入型	パネル構法	東日本を中心に年 6000 棟以上の工業化住宅を生産している大手工業化住宅メーカーの住宅。事例 A と同様に木質パネル構法であり、北欧材はパネル用芯材の他、窓枠に用いられている。

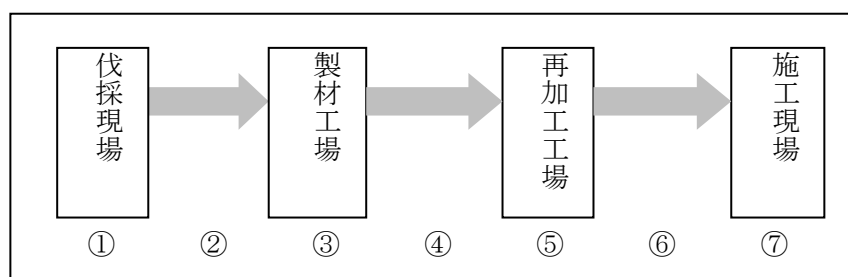


図 1. 住宅生産工程フロー

図 1 に示すように、生産プロセスを①伐採段階、②輸送ア段階、③製材乾燥段階、④輸送イ段階、⑤再加工段階、⑥輸送ウ段階、⑦施工段階、とし木材の生産プロセスにおける負荷を詳細に把握するため評価を行った。なお、輸送アは伐採現場から製材工場までの輸送、輸送イは製材工場から再加工工場までの輸送、輸送ウは再加工工場から施工現場までの輸送とする。

機能単位は木造住宅に使用される構造材 1 m³とする。よって、木造軸組構法の事例 A, J では秋田県で生産される製材品、木質パネル構法の事例 M, S では北欧で生産されるパネル芯材を対象とする。「機能単位」という厳密な意味からは、パネル構法の場合パネル芯材のほかに面材として合板も対象とすべきであるが、今回は合板の生産工程に関しては調査ができなかったため対象外とする。事例 S の北欧での一部の輸送を除き、陸上輸送は全てトラックによる。帰便の利用状況について調査ができなかった事例もあったため今回は往路のみの CO₂ 排出量を計算する。聞き取り調査でトラックのトン数を明らかにできなかった場合は、輸送アは 10 t トラック、輸送イ、輸送ウは 4t トラックを使用したものとする。輸送回数が聞き取り調査により明らかになっている場合は「燃費法」、得られなかった場合は「トンキロ法」によって輸送による CO₂ 排出量を計算する。トンキロ法で必要となる木材の比重については、スギの全乾比重を 0.33 として、丸太を含水率 100% の 0.66 (1 m³ = 0.66 t)、乾燥製材を含水率 15% の 0.38 m³ (1 m³ = 0.38 t) とする。M

社、S社でパネル芯材の原料としているホワイトウッドについても比重はスギと同じとする。施工段階は、棟上時までとする。インベントリデータは、可能な限り聞き取り調査の結果をもとに行うものとするが、一部必要なデータが得られなかった部分に関しては、文献値や妥当と思われる仮定値を適用した。

・CO₂排出量計算結果

事例A, J, M, Sの4事例の計算結果を整理すると、以下の表4のようになる。また、個々の段階ごとの結果を図示したものが図2である。

表4. 生産段階の4事例の計算結果

単位:kg-CO ₂ /m ³		伐採	輸送ア	製材+乾燥	輸送イ	再加工	輸送ウ	施工	合計
地産地消型	事例A	22	7	111	3	8	20	9	180
一般流通型	事例J	22	6	123	25	11	2	7	196
輸入型	事例M	4	5	39	94	47	7	17	213
	事例S	4	16	39	86	16	2	39	202

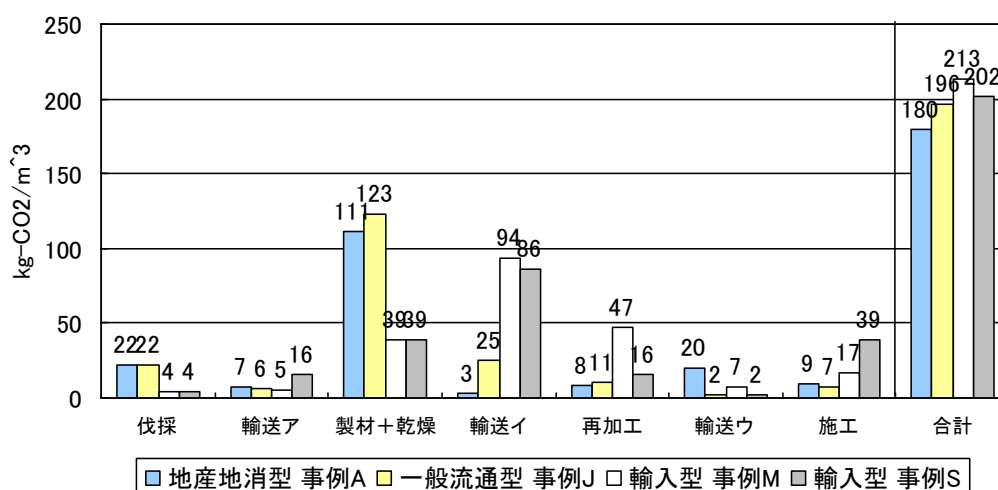


図2. 生産段階の4事例の計算結果

さらに、各段階の結果を積み上げた結果を図示したものが図2、各段階の合計値に占める割合を示したものが図3である。

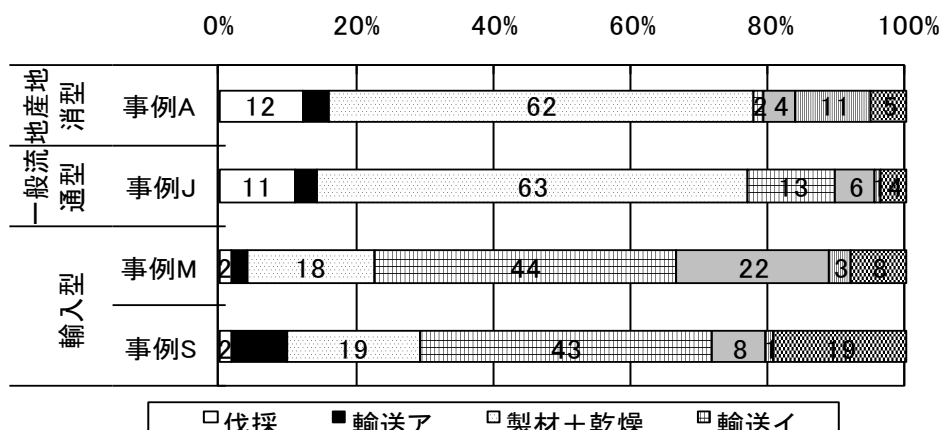


図3. 生産段階の4事例の計算結果 (割合)

生産段階のみに限って、CO₂排出量を積み上げると、事例Aが最も少なく事例Mが最も大きい結果になった。事例Aは「製材+乾燥」段階の占める割合が62%と大部分を占めたが、生産地と

消費地が近接するため輸送距離が短くなり輸送に関わる負荷が低い。2番目にCO₂排出量が低くなったのは、事例Jであり「製材+乾燥」段階の割合が、63%と大きい。事例Aと比較すると、国内の輸送の割合が大きくなっているのが13%とそれほど大きくない。3番目にCO₂排出量が大きかったのは、事例Sであった。事例Sでは、海外から日本までの輸送距離の割合が43%と最も大きくなり、長距離の海上輸送によるCO₂排出量の影響が顕著に現れているといえる。最もCO₂排出量が大きかったのは、工業化住宅メーカーM社の事例Mであった。事例Mでは、海外から日本までの輸送が44%と最大であり、事例Sと同様である。一方、事例Sでは影響度の小さかった「再加工」の影響度が事例Mでは高い。これは、M社では再加工工程を日本国内で行っており、日本の電力原単位が北欧諸国の5倍ほどの値であることが原因と考えられる。

3. 各建材における他産業も含めたマテリアルフロー構築と評価システム

建材における再資源化システムの構築を考える際、新たに循環される資源（リサイクルされる物）の資源量のみでなく、再資源化システムの変化により流通の変化が起こると考えられる。そこで、それらの変化を包括的にとらえるために産業構造、ステークホルダーの存在を明らかにしなければならない。そこで本研究では、表.2に示す参考資料、ヒアリング調査を基にステークホルダーに注目し、他産業を含めたマテリアルフローの構築を行った。

表.5 マテリアルフロー構築に用いた参考資料

材料	資料名
木材	「木質バイオマス利用実態調査」(平成17年)
	「木材統計」(平成18年)
	「紙パルプ統計」(平成18年)
	「木材輸入実績」(平成19年)
	「建設副産物実態調査」(平成17年)
ガラス	「窯業建材統計年報」(平成19年)
	「窯業建材統計」(平成11年)
	「ガラスリサイクル促進協議会ホームページ」
石膏ボード	「平成20年度廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務調査報告書」
	「平成14年度石膏ボードリサイクル促進に関する検討調査検討」
	「石膏ボード工業会ホームページ」

加えて、構築したマテリアルフローに基づいてCO₂排出量、最終処分量および経済性の評価を行う。構築したマテリアルフロー内に存在する処理によって排出される代表的なCO₂原単位を適用し、フローに合わせて算出を行った。加えて、木材に関しては重油などに代わり燃料として利用されている。そのため木材は、代替効果を含めた環境影響評価を行っている。CO₂原単位に関しては、JEMAI-LCAの原単位や、実態調査および、文献資料よりデータを収集している。

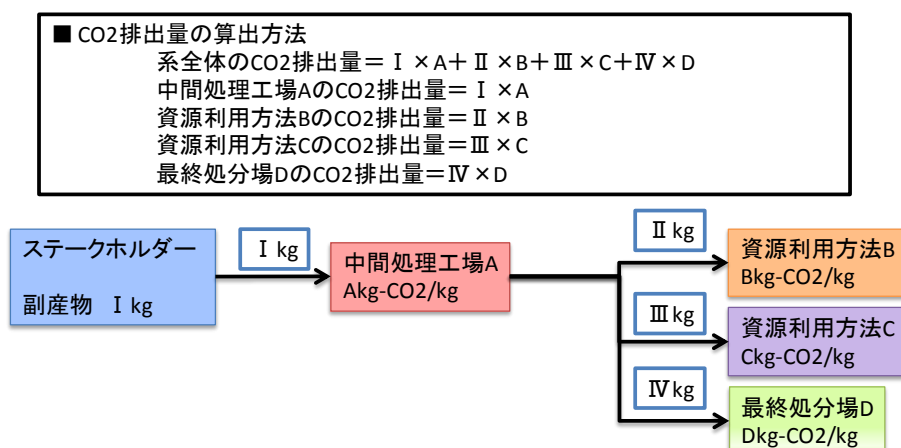


図.4 環境負荷の算定方法

また、本研究では再資源化システムの事業性を考察するために経済性の評価を行っている。マ

テリアルフローは、副産物の流通を表している事から、マテリアルフローに基づき流過程における金銭の授受が発生したと仮定し、経済性の評価を行っている。これらの価格は、動態統計や、貿易統計、報告書などより収集している。

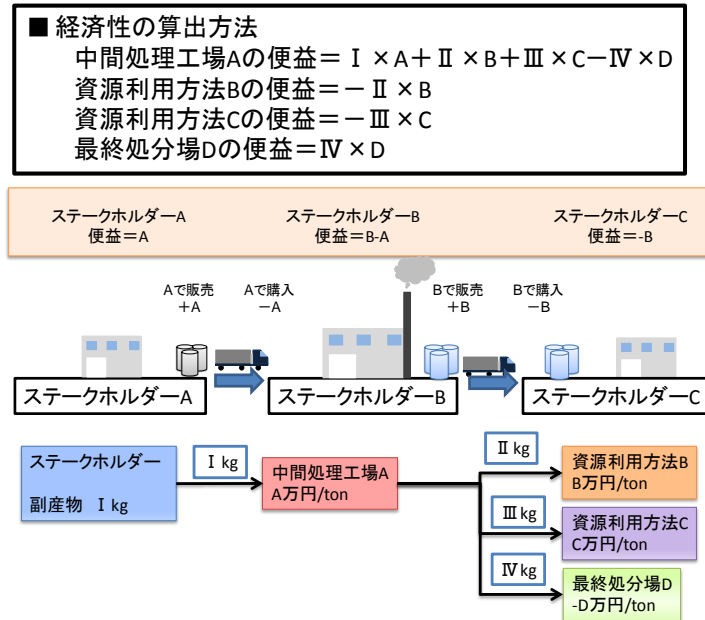


図. 5 経済性の算定方法

以上の評価方法で、他産業も含めたマテリアルフローを構築および、それに基づいた CO2 排出量最終処分量、経済性の評価を行った。

・ 木材

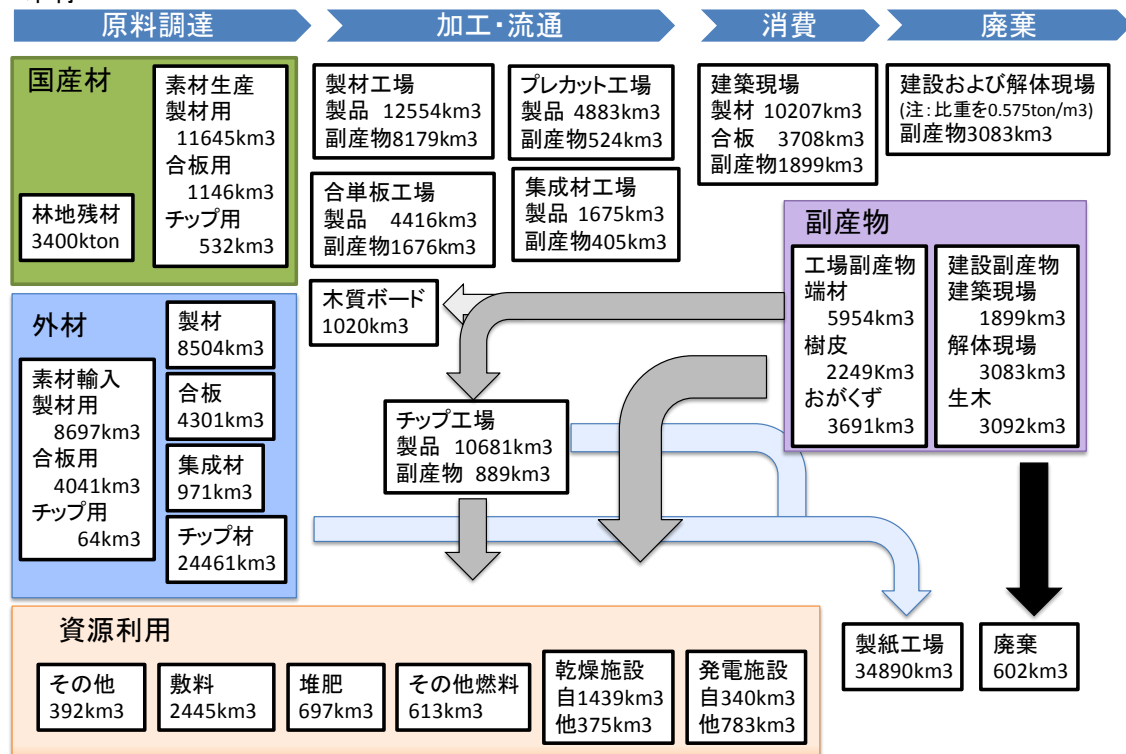


図. 6 木材の他産業利用も含めたマテリアルフロー

木材における副産物の発生は、大きく分類し伐採、木材加工、建設副産物の3つに分けることができる。これら副産物の性状、品質は大きく異なっており、伐採時に排出される副産物としては間伐材があり、それらは曲がった丸太や、細い材などである。そのため伐採時に排出される木質系副産物は、集成材などに利用できるなど、幅広く利用可能である。木材加工時に排出される副産物は、おが粉、樹皮、端材といったものであり、品質、および性状もかなり異なる。おが粉や樹皮は、燃料や、肥料、敷き料などに再資源化されている。端材は、集成材やボード材などに利用される他、パルプ用チップとしても利用されている。建設副産物は、柱などの大きな材はボード原料やパルプ用チップなどに再利用される。一方、塗料や有害物質の関係も存在しているため、マテリアルリサイクルが望ましくない廃材も多く存在しており、異物の混入や、塗料など付着している材は、燃料として利用される場合が多い。木材は、このように再資源化されているが、木質燃料は近年の地球温暖化の問題により、バイオマス発電や燃料利用に注目が集まっており、今後、多くの木質副産物および未利用材がエネルギー利用されることと考えられる。

以上の状況を踏まえて、木材における他産業を含めた評価を行った。CO₂排出量に関して評価の範囲は、木質副産物が処理されるか、もしくは有価なものとなるまでと設定した。CASEの設定は、CASE1が現状、CASE2は極力マテリアルリサイクル、CASE3は燃料として極力利用するCASEの3つのCASEを設け、CO₂排出量および最終処分量の評価を行った。

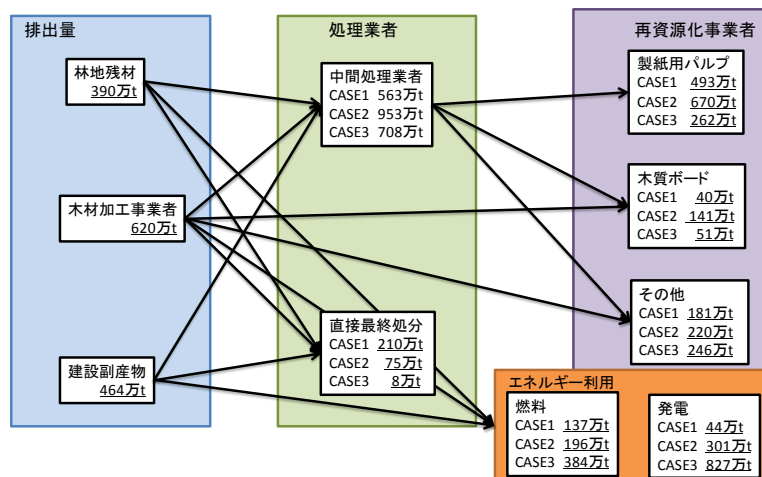


図.7 木材のケース別マテリアルフロー概要

木材の現在の副産物利用ではCO₂排出量は約50万t、削減効果を含めると20万tとなった。最終処分量は約8万tとなった。CO₂の削減効果を含めると約20万tである。また、CASE2、CASE3ともCO₂削減効果は大きくなっており、最大で現状の約250万t削減できるという結果となった。木質系副産物を用いてCO₂削減を行うためには、エネルギーとして、化石燃料の代替とすることが、有効な手段であると考えられる。一方、最終処分量に関しては、

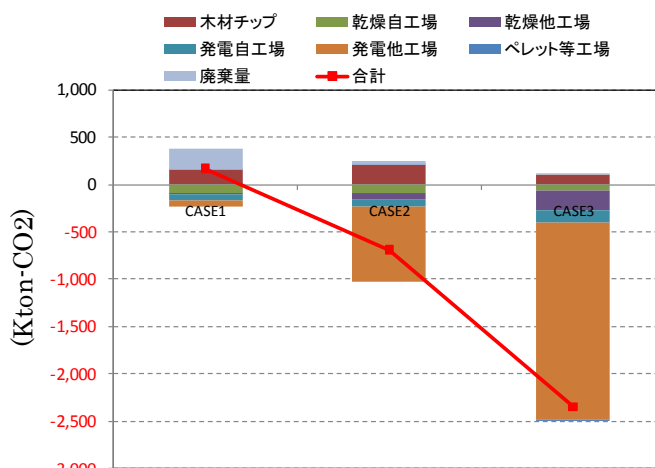


図.8 木質系副産物のCO₂評価結果

燃料として多く木質系副産物を利用するため、焼却灰が発生するため、最終処分量としては増加してしまう傾向にあるといえる。木質副産物に関しては、大きなCO₂削減効果が見込めるものの、一方最終処分量を増やす傾向にあるといえる。

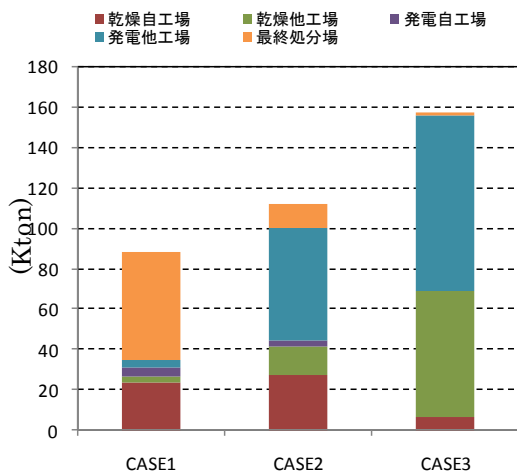


図. 9 木質系副産物の最終処分量

・板ガラス

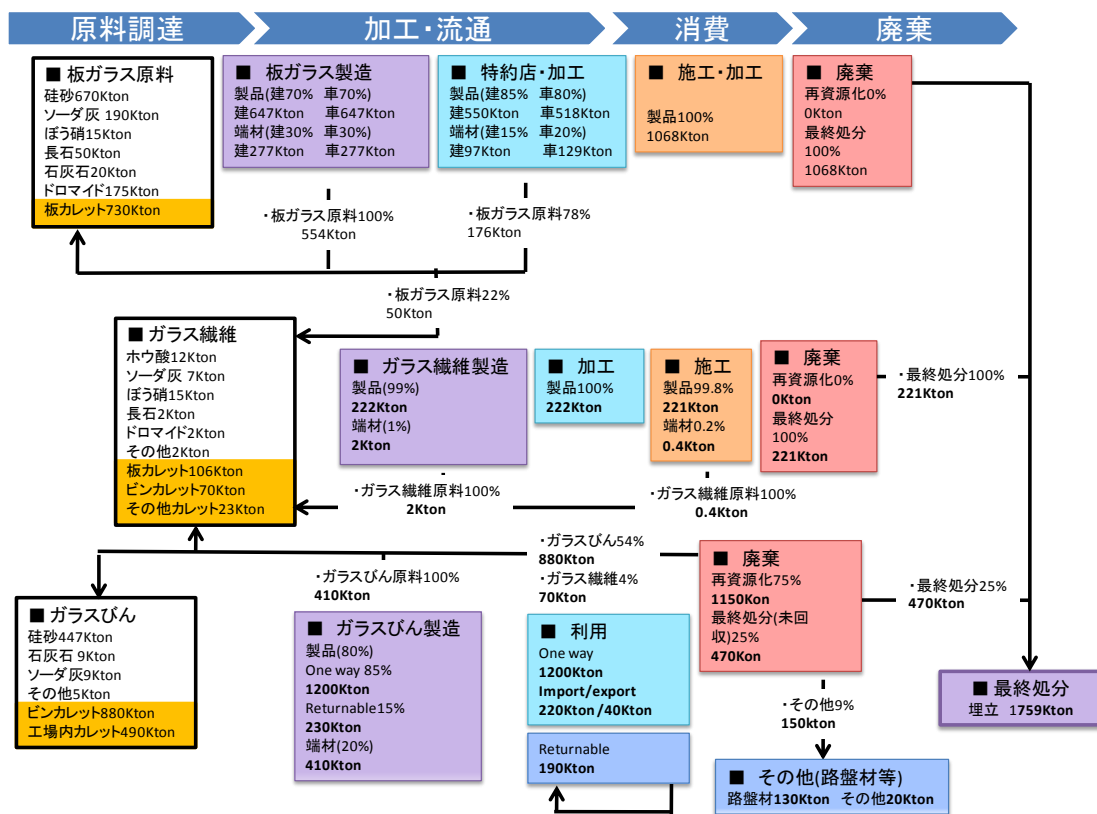


図. 10 板ガラスの他産業利用も含めたマテリアルフロー

板ガラスの排出条件は、工場端材、市中廃材、解体材の3つの段階に分けられ品質が大きく異なっている。そのため、3つの段階で再資源化の状況も異なっている。工場端材は、ほぼ全量が再資源化されており、ほとんどが板ガラスの原料として再資源化されている。市中廃材は、主に窓製造時に排出される端材のことであり、単一の製品を製造しているため安定した品質で回収され、板ガラス原料、グラスウールの原料として利用されている。一方、解体材に関しては、異物混入のリスクや、回収の手間などから、ほぼ全量が最終処分されているのが国内の状況である。一方、オランダなどでは、解体現場から排出される板ガラスを回収し、再資源化を行っている。これらの状況を踏まえ本研究における他産業も含めた評価では、LCA 評価手法を参考とし構築し

たマテリアルフローを基に、国内のガラス産業の現状のCO2排出量および、最終処分量の評価を行った。また、国内においての再資源化システムが高度に構築された場合のケーススタディを行った。ケース設定は、解体現場から排出される板ガラス廃材が回収されガラスびん、ガラス繊維の原料として再資源化された場合をCASE2、CASE3は、解体現場から排出される板ガラス廃材が回収され板ガラスの原料として利用された場合と仮定し、フローの変化概要を図10に示す。それぞれのCASEで生産される製品の製造量は同一として設定を行なっている。CO2排出量算出の注意事項として、ガラス製品製造に関わるエネルギー投入は、カレット(再資源化原料)利用率によって変動するため、それらを考慮し算出している。

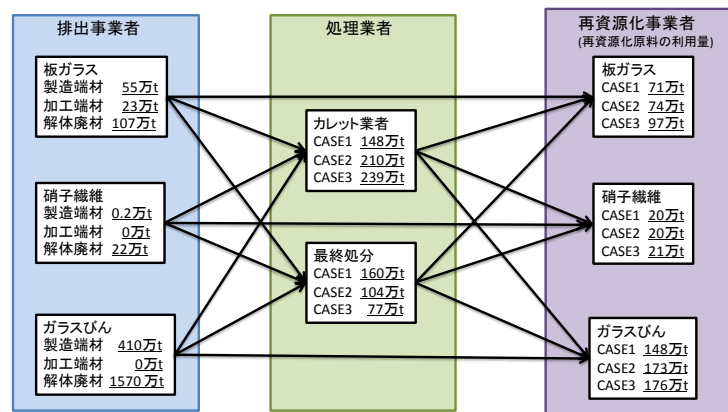


図. 11 ガラス産業のケース別マテリアルフロー概要

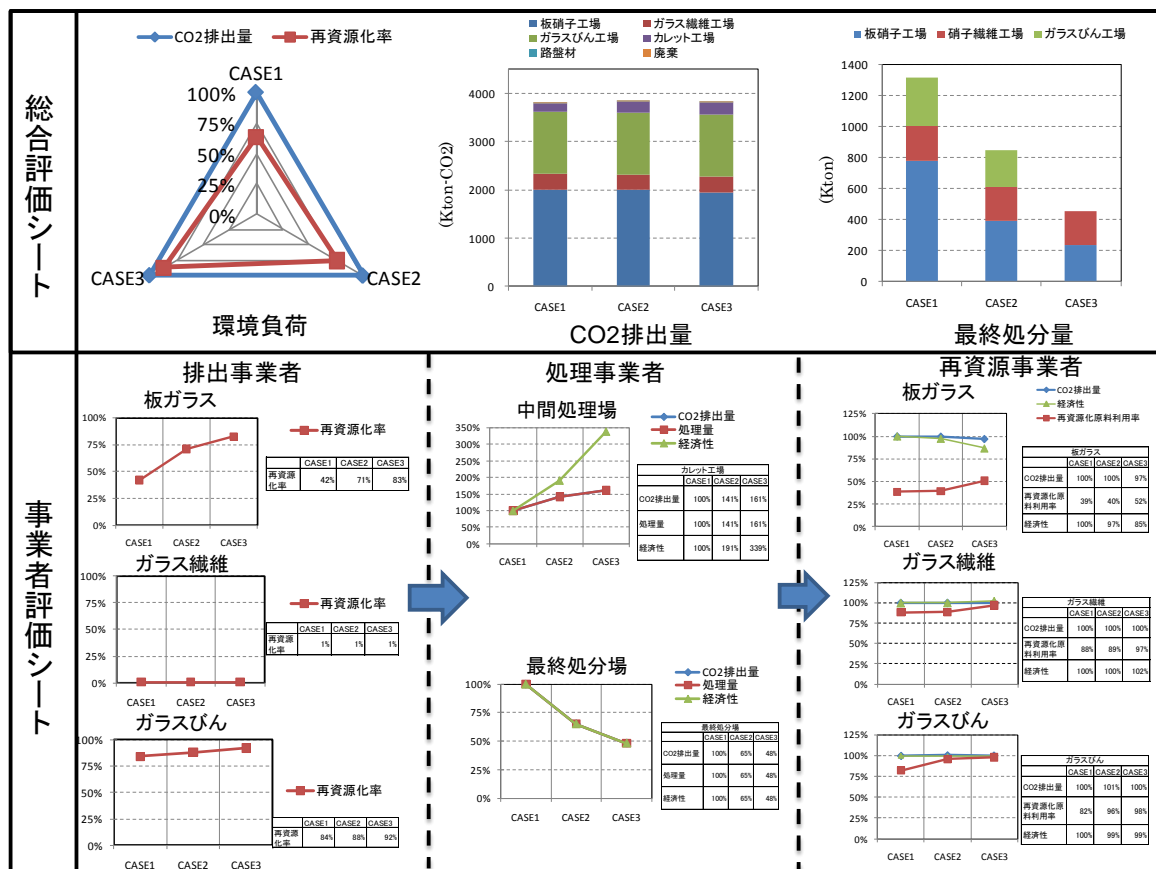


図. 12 板ガラス産業の他産業も含めた評価結果

ガラス産業内(板ガラス、ガラスびん、硝子繊維)でのCO₂排出量は約400万トンであることが分かった。また最終処分量に関しては、現在製造されている製品が使用済みになるまでと仮定すると約130万トンが最終処分されることが分かった。

国内のガラス系副産物を利用する再資源化システムが、現状よりも高度になったと仮定した場合でも、CO₂排出量の変化量は少なく削減効果が低い事が分かった。一方、最終処分量に関しては大きな削減効果が期待できると考えられる。高度な再資源化システムを形成するためには、再資源化事業者の協力が必要となることは言うまでもないが、CASE3とした場合、板ガラス製造事業者の収益性の悪化が個別の評価からみてとることができる。そのため、CASE3を実行する場合には、板ガラス製造事業者へ何らかの補助が必要であるといえる。

・石膏ボード

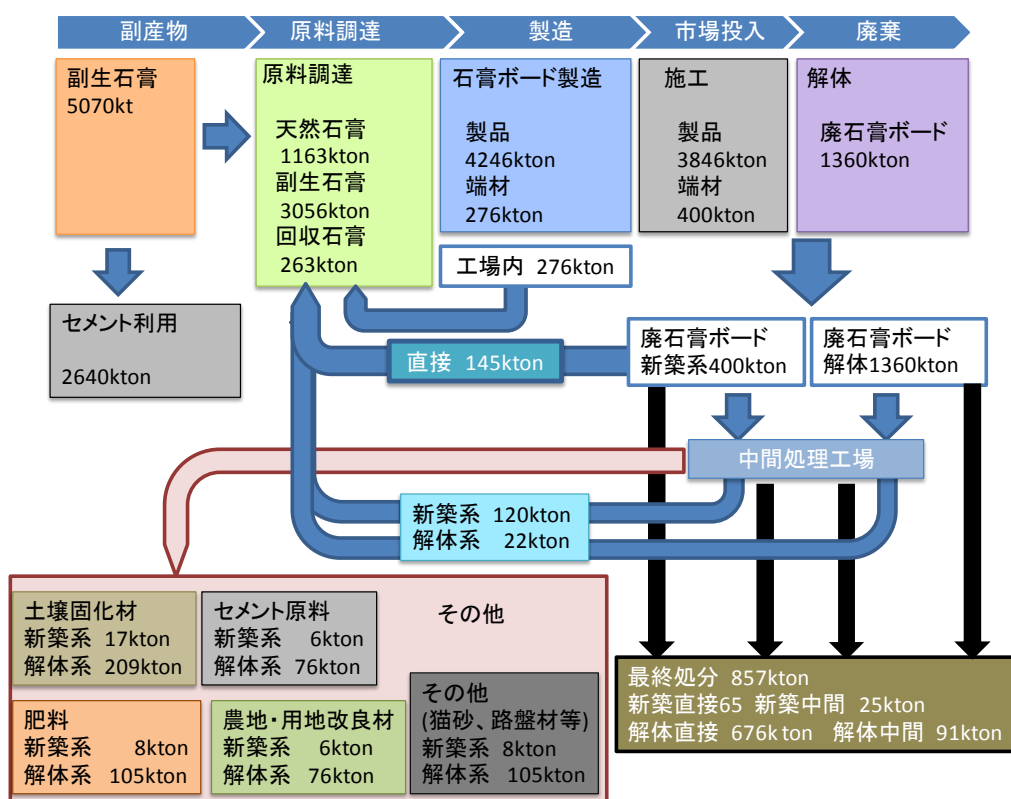


図.13 石膏ボードの他産業利用も含めたマテリアルフロー

石膏ボードは、原料調達の時点で火力発電所や化学工場などから副産物として排出される副産石膏を石膏原料として約60%利用しており、原料調達の段階から他産業から排出される副産物と大きく関わりを持っているといえる。石膏ボードの製造端材、新築系の端材は、多く石膏ボードの石膏原料として再資源化されるが、解体系廃材は、一部石膏ボード原料として利用されているが、大部分がボード原料には利用されておらず、セメント原料や、肥料、固化剤などに利用されている。

今回の評価では、現状のCO₂排出量および最終処分量の評価を行い、CAS2では副産石膏を受け取らず、天然石膏を利用した場合と仮定した。CASE3では、石膏ボードおよび、その他の業界も他産業から排出される副産物を積極的に利用した場合と仮定し評価を行った。

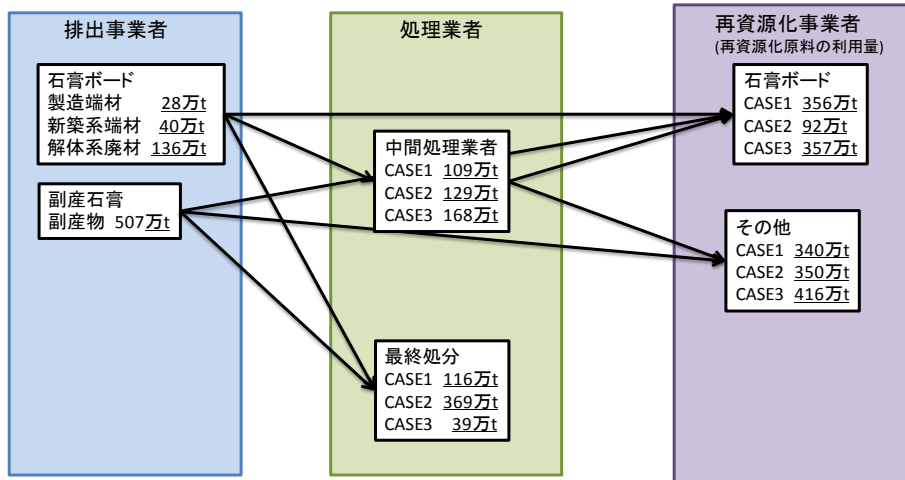


図. 14 石膏ボードのケース別マテリアルフロー概要

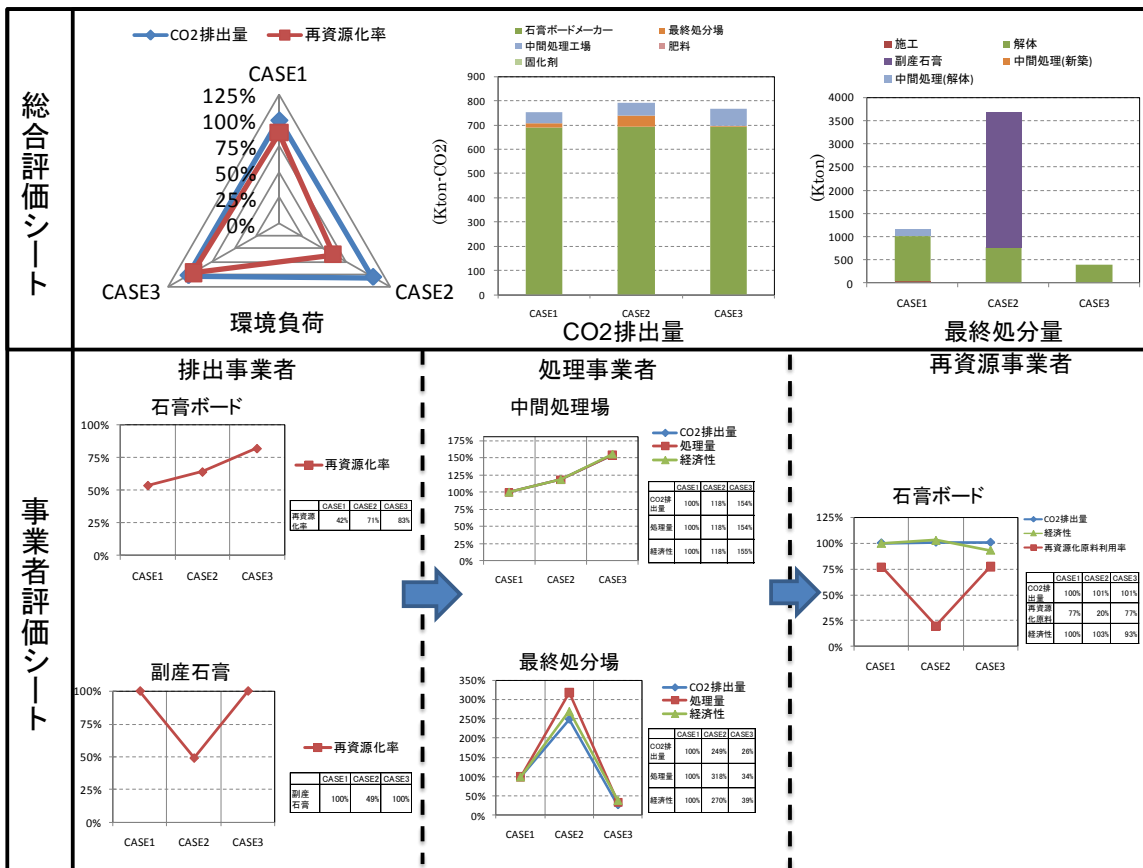


図. 15 石膏ボード産業の他産業を含めた評価結果

石膏産業の他産業を含めた評価では、現在の石膏産業のCO₂排出量は約70万t、最終処分量は約120万tとなった。CASE2では、廃棄処分に関するCO₂排出量が増加するため、約5万tのCO₂排出量が増加するほか、最終処分量については、石膏を利用している産業全体では最終処分量が約250万t増加する結果となった。CASE3では他産業への再資源化を積極的に行うことで、中間処理CO₂排出量は多少増加するが、最終処分量としては大きく削減できる結果となった。

他産業との連携が取られない場合は、大量の副産物が最終処分される結果となったが、他の産

業と連携をとることで、最終処分量を大きく削減できることが分かった。

結論

本研究では、木材、板ガラス、石膏ボードの3つの建材に注目し、副産物の流通を捉え他産業との関連性を明らかにすると同時に、それらの流通を捉えた形でのマテリアルフロー構築を行い、木材、板ガラス、石膏ボードのマテリアルフローを明らかにした。また、構築したマテリアルフローに基づいて、LCA評価手法を用いCO₂排出量および最終処分量を定量的に把握することができた。加えて、CO₂排出量の削減効果および最終処分量も把握することができた。

今回の他産業を含めた評価では、一事業体の再資源化目標を目的とするのではなく、同一の資源を利用する事業者全体の評価を行うことで、他産業を含め最終処分量およびCO₂排出量の削減を検討していくことが重要であることを示した。資源利用が複雑になっている現在、再資源化システムを構築する際にも、他産業との連携をとることが重要になり、しいていえばそれらの連携体制が、環境負荷削減に向けた循環型社会形成への第一歩になるのではないかと考えられる。

また、環境負荷削減にとって大きな効果が発揮される再資源化技術および事業でも事業者に必要な負担を抱えさせる事業も少なくない、そこで、本研究において経済性を評価指標にいれ、再資源化システムの事業性について評価できるよう検討を行った。このように経済性を考慮することで、事業者に過度な負担をかけない再資源化システムの構築を提案し、行うことができると考えられる。

本研究では、木材、板ガラス、石膏ボードの3建材に関して、副産物利用に着目し同一資源を利用している他産業を含め再資源化システムの評価を行い、環境負荷削減に向けた方策は、一事業者のみでなく、同一資源を利用している事業者を包括的に捉え、環境負荷削減の提案を行うことの重要性を示した。

英語概要

・研究課題名

A study to create the recycling evaluation system of the construction waste in consideration of the material flow that included the other industry

・研究代表者名及び所属

SEIKE Tsuyoshi/Associate Professor/Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

・研究代表者名及び所属

AKITA Noriko/Researcher/ Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo (In H19)

KADORIKU Yorika/ Researcher/ Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo (In H20)

・要旨

This research aims to create the recycling evaluation system for the construction waste and construction by-products in consideration of the whole material flow that included the other field industries. Generally, building materials are including by-product of the other industry product in raw materials, or recycling material that was generated by production manufacturing process. However, as for the present indexes to evaluate reduction of the environment load, it cannot evaluate measurers of the environment load adequately because it is limited to the recycling rates in the own product and the amount of last disposal. In this year, I constructed material flows that included the other field industries. And I built a new framework to evaluate recycling construction wastes system. This tool can evaluate construction waste in CO2 emission and final disposal. Additional it can evaluate in economical index to consider possibility of recycling business in manufacturing factory.

・キーワード

Recycling evaluation system, construction waste, material flow,